

необходимости учета этого фактора при расчете технологических параметров процесса. Так, при изменении скорости деформации в 10 раз относительное удлинение образцов увеличивается в 1,3 раза.

Полученные данные позволяют проектировать процессы пластической деформации (в частности, листовой штамповки) с учетом скорости и степени деформации, а также для оценки энергосиловых параметров. Следует отметить, что для адекватного переноса приведенных результатов на другие процессы обработки давлением лучше использовать инвариантные величины (например, интенсивности напряжений и деформаций). Эти величины рассчитываются, исходя из результатов данных лабораторных исследований с применением расчетных формул (например, [8]).

Проведенные исследования и полученные данные являются основой для дальнейшей работы по разработке технологии глубокой вытяжки цилиндрических изделий из алюминиевых и магниевых сплавов в условиях, близких к условиям сверхпластичности.

**Список литературы:** 1. Kawalla R. Magnesium ein wichtiger Werkstoff der Zukunft/ R.Kawalla, K.Vorobyov, A.Stolnikov, H.Pircher, B.Engl, M.Weber//Tagungsbank (MEFORM2003). – Freiberg, Deutschland. - 2003. 2. Данченко В.Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов. Теория и технология [Текст]/В.Н.Данченко, А.А.Миленин, А.Н.Головко. – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. – 448с. 3. Бобух К.А. Комплексное влияние режимов прессования и последующей термообработки на механические свойства профилей из сплава Al-Mg-Si [Текст] / К.А.Бобух, А.Н.Головко. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. - №4. – С.48-50. 4. Хассель Т. Пластометрические испытания магниевых сплавов MgCa<sub>0,8</sub> и MgCa<sub>4,0</sub> [Текст] / Т.Хассель, О.Кузьмина, А.Головко. //Сб.научн.тр. ДГМА. ОМД. –Краматорск. - №1 (19). – 2008 – С.151-154. 5. Ступка А.Г. Математическая модель прогнозирования микроструктуры и механических свойств изделий, получаемых ковкой и штамповкой [Текст]/А.Г.Ступка, В.А.Гринкевич, О.М.Кузьмина. //Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Темат. Зб. Наук. Пр. – Краматорськ. – 2001. - С.358-360. 6. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента [Текст]/Ф.С.Новик, Я.Б.Арсов. - М.: Машиностроение, 1980.- 304 с. 7. Кузьмина О.М. Исследование влияния параметров горячей осадки на неравномерность структуры заготовок с помощью численного моделирования [Текст]/О.М.Кузьмина, В.А.Гринкевич//Наукові вісті. - Дніпропетровськ: «Системні технології». - 2005. – Т.8. – С.484-487. 8. Данченко В.Н. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. [Текст]/В.Н.Данченко, А.А.Миленин, В.И.Кузьменко, В.А.Гринкевич. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2005.- 448 с.

**УДК 621.777.01: 53.072.22**

**ПЕРИГ А. В.**, асс. ДГМА, г. Краматорск

**ЛАПТЕВ А. М.**, докт. техн. наук, проф., ДГМА, г. Краматорск

**ГОЛОДЕНКО Н. Н.**, канд. физ.-мат. наук, доц., ДонНАСА, г. Макеевка

**ЕРФОРТ Ю. А.**, доц., ДГМА, г. Краматорск

**БОЙКО И. И.**, студ. ДГМА, г. Краматорск

# **АНАЛИЗ НЕОДНОРОДНОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЯЗКОМ ТЕЧЕНИИ МАТЕРИАЛОВ В НЕПРЯМОУГОЛЬНОМ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ШТАМПЕ**

На примере вязкого течения пластилина при равноканальном угловом прессовании (РКУП) через непрямоугольный штамп, исследовано влияние реологических особенностей обрабатываемых материалов на степень неоднородности деформированного состояния.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование, уравнение Навье-Стокса, конечноразностное решение, физическое моделирование, пластилин

На прикладі в'язкої течії пластиліну при рівноканальному кутовому пресуванні (РККП) через непрямокутний штамп, досліджено вплив реологічних особливостей оброблюваних матеріалів на ступінь неоднорідності деформованого стану.

Ключові слова: рівноканальне кутове пресування, рівняння Нав'є-Стокса, скінченнорізницевий розв'язок, фізичне моделювання, пластилін

The influence of rheological properties of processed materials on deformation heterogeneity has been studied for the viscous flow of plasticine during Equal Channel Angular Extrusion (ECAE) through a non-rectangular die.

Key words: equal channel angular extrusion, Navier-Stokes equation, finite difference solution, physical simulation, plasticine

## **1. Введение**

В настоящее время методы интенсивного пластического деформирования (ИПД) представляют большую ценность для современных металлургии, машиностроения, химической промышленности и медицины. Одним из главных направлений ИПД является равноканальное угловое прессование (РКУП), или, иначе говоря, равноканальная угловая экструзия (РКУЭ), которое позволяет получать мелкозернистые металлы, сплавы, композиты и порошковые полуфабрикаты с повышенными показателями усталостной прочности при сохранении высоких удельной прочности и технологической пластичности в области эксплуатационных температур для деталей авиационной техники, оборудования химической промышленности, медицинских имплантатов и т.д. [1]. Кроме того, при обработке полимерных материалов РКУП обеспечивает существенные структурные изменения исходного материала, связанные с разрушением сфероидов и их трансформаций в пакеты кристаллических ламелей, а также повышение квазистатической трещиностойкости и ударной

прочности аморфно-кристаллических и аморфных полимеров, а также полимерных композитов [2]. Процесс РКУП реализуется накоплением пластической деформации в обрабатываемом материале посредством многократного деформирования смазанной заготовки в штампе с двумя пересекающимися каналами одинакового поперечного сечения при сохранении её первоначальной формы и размеров [3].

В то же время протекание процесса РКУП характеризуется значительными неравномерностью и неоднородностью деформированного состояния обрабатываемого материала, что в значительной степени усложняет промышленное использование технологии РКУП и требует дополнительного исследования как деформированного состояния обрабатываемых заготовок, так и геометрических особенностей пластического течения материалов в угловых штампах. Кроме того, современные гипотезы о существовании аналогии между пластическим течением поликристаллов при РКУП и турбулентным течением жидкостей [4] не в полной мере согласуются с классической теорией пластичности и требуют дополнительных исследований, что и определяет актуальность исследуемой проблемы.

## **2. Постановка проблемы**

Основные особенности пластического течения материалов при РКУП можно проанализировать с использованием таких геометрических методов, как метод слоистых моделей [5] либо метод маркеров [6]. При этом в известных ранее публикациях [5]-[7] не изучались вопросы динамики локального пластического течения материалов при физическом моделировании РКУП через штампы со сложной геометрией, в частности с тупым углом между входным и выходным каналами, что позволяет сформулировать задачи настоящего исследования:

I. спроектировать и разработать технологическую оснастку для эмпирического исследования неравномерности и неоднородности деформированного состояния обрабатываемых материалов при РКУП;

II. исследовать влияние реологических особенностей обрабатываемых материалов на степень неоднородности деформированного состояния на примере вязкого течения пластилина в непрямоугольном угловом штампе;

III. проанализировать правомерность существующей аналогии между пластическим течением поликристаллов при РКУП и турбулентным течением вязких жидкостей.

## **3. Изложение основного материала исследования**

Для экспериментального исследования пластического течения материалов при РКУП в рамках физического моделирования был изготовлен деревянный разъемный штамп для РКУП с прозрачной боковой стенкой и деревянный пуансон, причем ширина входного и выходного каналов штампа  $a=27$  мм, угол между входным и выходным каналами составляет  $2\theta=105^\circ$ , а внешнее закругление отсутствует  $\varphi=0^\circ$  (рис. 1). Поперечное сечение каналов штампа на рис. 1 – прямоугольник с размерами  $27 \times 14$  мм<sup>2</sup>. Чтобы при прессовании заготовки избежать вытекания материала из зоны кана-

лов под стекло, половинки разъемных штампов стягиваются гайками вдоль каналов (рис. 1а).

Экспериментальные данные на рис. 1б–г показывают наличие зоны турбулентного течения материала на промежуточной стадии РКУП, характеризующейся большими растягивающими деформациями с поворотом осей течения на углы порядка  $30^\circ$ – $45^\circ$ . При этом на этапе выдавливания пресс-остатка зона турбулентности практически исчезает.

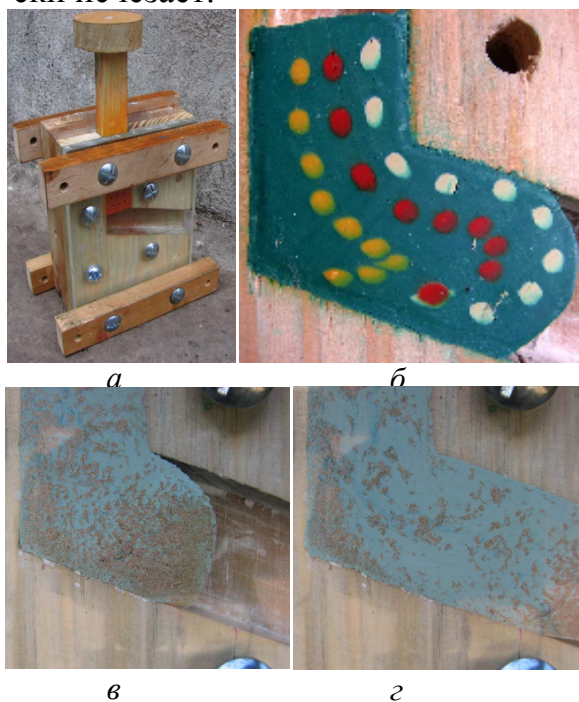


Рис. 1. Пластилиновые образцы на нестационарной (б, в) и установившейся (г) стадиях течения при прессовании в деревянном разъемном штампе с  $2\theta=105^\circ$  и внешним закруглением  $\varphi=0^\circ$  (а)

Для осуществления прессования заготовок из мягких модельных материалов (пластилин, воск, парафин, глина) использовался специально разработанный и сконструированный гидравлический стенд (рис. 2), причем 1 – станина стенда, 2 – основание, 3 – рабочий стол стенда, 4 – крышка стенда, 5 – силовой гидроцилиндр (рис. 2а), 6, 7, 16 и 25 – манометры, 9 – дроссельный кран, который управляет расходом жидкости, поступающей в поршневую полость силового цилиндра, 10 – кран, управляющий скоростью движения штока силового цилиндра, 11, 17 – дроссельные краны (рис. 2б, в), 12 – штамп для РКУП, 14 – энергосиловой гидравлический аккумулятор (рис. 2в), 15 – зарядное устройство аккумулятора, 18 – штуцер, 19 – гидравлическая станция, 20 – агрегат управления, переключающий силовой цилиндр стенда на рабочий ход и реверс в исходное положение, 21 – ручной насос, 22 – гидроаккумулятор, 22 – обратный клапан, 24 – предохранительный клапан (рис. 2г).

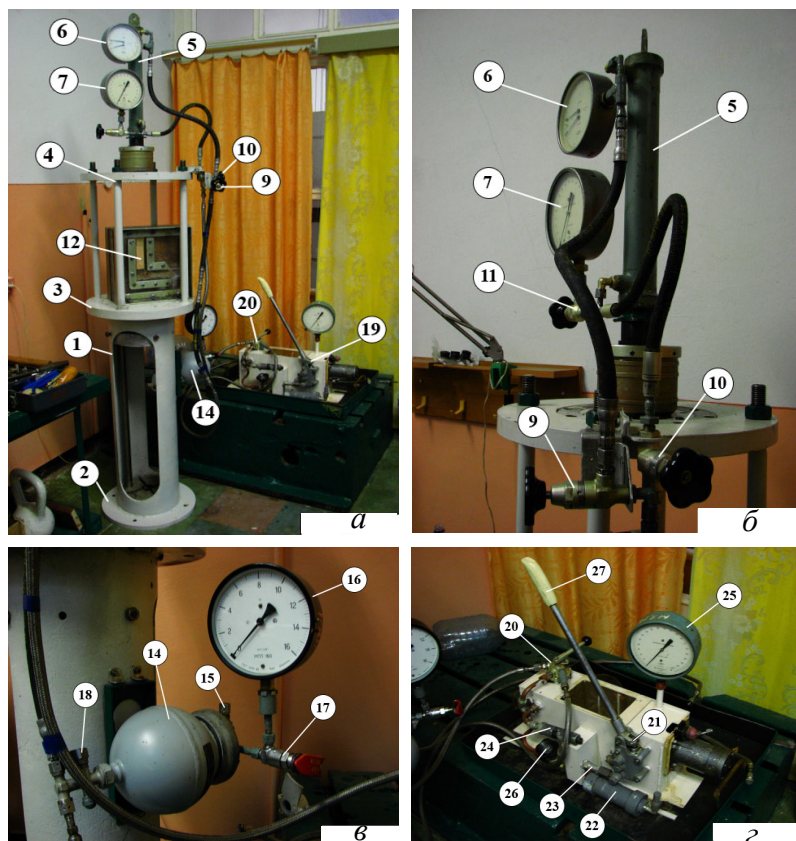


Рис. 2. Общий вид гидравлического станда для прессования мягких заготовок при физическом моделировании РКУП

С использованием разработанных углового штампа (рис. 1) и гидравлического станда (рис. 2) были получены экспериментальные зависимости для давления и скорости прессования (рис. 3), где максимальное давление прессования  $\langle p \rangle = 474$  кПа (рис. 3а) при средней скорости прессования  $\langle V \rangle = 0,17$  мм/с (рис. 3б).

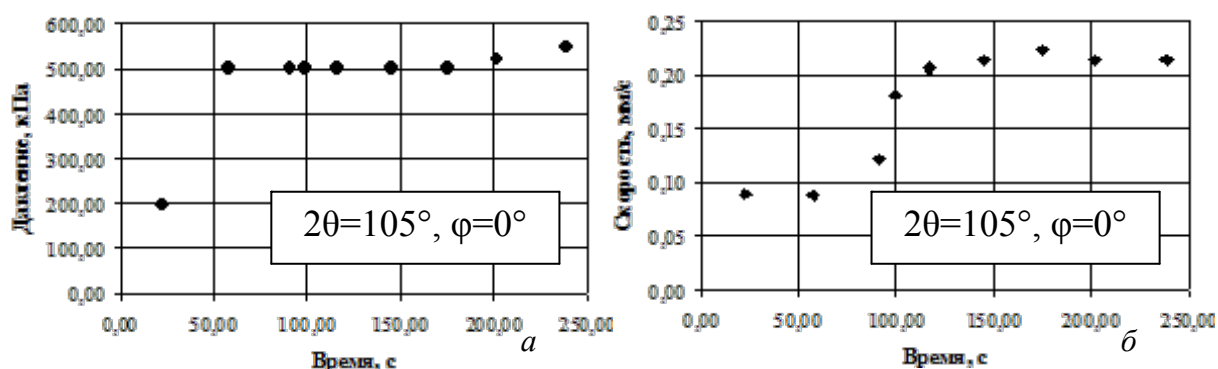


Рис. 3. Эмпирические временные диаграммы для давления (а) и скорости (б) прессования пластилина через штамп для РКУП с углом  $2\theta=105^\circ$  между входным и выходным каналами

Проанализируем локальное пластическое течение мягких материалов при физическом моделировании РКУП. В качестве вязкого приближения к анализу течения материала при РКУП воспользуемся уравнениями Навье-Стокса в размерных величинах [8]:



$$\frac{\partial \bar{t}}{\partial \bar{x}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{t}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{t}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \frac{\bar{\eta}}{\bar{\rho}} \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} + \frac{\bar{\eta}}{\bar{\rho}} \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right) \quad (2)$$

и уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0, \quad (3)$$

где чертой сверху обозначены размерные величины:  $\bar{x}, \bar{y}$  – координаты;  $\bar{t}$  – время;  $\bar{u}$  и  $\bar{v}$  – размерные составляющие скорости вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно;  $\bar{\rho}$  и  $\bar{\eta}$  – плотность и вязкость обрабатываемого материала;  $\bar{P}$  – давление прессования.

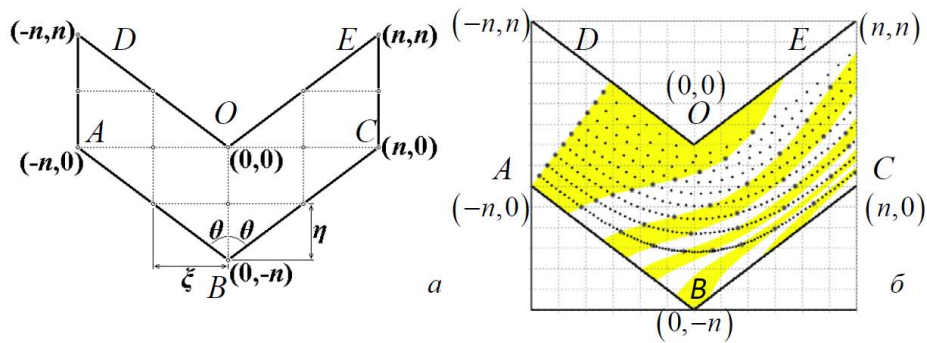


Рис. 4. Расчетная схема штампа для РКУП с углом  $2\theta=105^\circ$  между входным и выходным каналами (а); расчетные линии тока в области очага пластической деформации (б)

Для решения задачи введем следующие безразмерные величины:  $x = \bar{x} / \bar{a}$ ,  $y = \bar{y} / \bar{a}$  – безразмерные координаты, где характерный размер  $\bar{a}$  – ширина канала;  $u = \bar{u} / \bar{U}_0$ ,  $v = \bar{v} / \bar{U}_0$  – безразмерные составляющие скорости вдоль осей  $x$  и  $y$ , где  $\bar{U}_0$  – скорость материала во входном канале штампа;  $P = \bar{P} / (\bar{\rho} \bar{U}_0^2)$  – безразмерное давление;  $Re = \bar{U}_0 \bar{a} \bar{\rho} / \bar{\eta}$  – число Рейнольдса;  $t = \bar{t} \bar{\eta} / (\bar{\rho} \bar{a}^2)$  – безразмерное время;  $x = Re \cdot ut$ ,  $y = Re \cdot vt$  – безразмерные координаты.

Согласно [8] продифференцируем (1) по  $y$  и (2) по  $x$ , исключим давление и определим вихрь как

$$\bar{\zeta} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}}. \quad (4)$$

Т. о. получаем уравнение переноса вихря

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}} - \bar{v} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}} + \frac{\bar{\eta}}{\bar{\rho}} \left( \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (5)$$

Это же уравнение в консервативной форме имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -\frac{\partial(\bar{u}\bar{\zeta})}{\partial \bar{x}} - \frac{\partial(\bar{v}\bar{\zeta})}{\partial \bar{y}} + \frac{\bar{\eta}}{\bar{\rho}} \left( \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (6)$$

Определим функцию тока следующими соотношениями:

$$\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{y}} = \bar{u}, \quad \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}} = -\bar{v}. \quad (7)$$

Тогда уравнение вихря (4) запишется в виде

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{y}^2} = \bar{\zeta}. \quad (8)$$

При переходе к безразмерным переменным безразмерный вихрь определяется как  $\zeta = \bar{\zeta} \bar{a} / \bar{U}_0$ , а безразмерная функция тока как  $\psi = \bar{\psi} / (\bar{U}_0 \bar{a})$  (рис. 5).

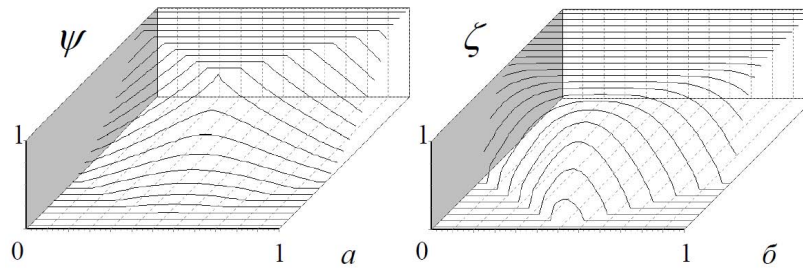


Рис. 5. Пространственные эпюры для функции тока  $\psi$  (а) и вихря  $\zeta$  (б) при РКУП пластилина через штамп с  $2\theta=105^\circ$ , где вход в очаг пластической деформации слева, а выход – вправо

Тогда уравнение переноса вихря (6) примет вид:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\text{Re} \left( \frac{\partial(u\zeta)}{\partial x} - \frac{\partial(v\zeta)}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2}, \quad (7)$$

где безразмерный вихрь

$$\zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (8)$$

Для численного решения задачи соотношение (7) записывается в конечных разностях по методу чередующихся направлений, причем алгоритм численного вихревого решения в случае РКУП можно проиллюстрировать следующей блок-схемой (рис. 6).

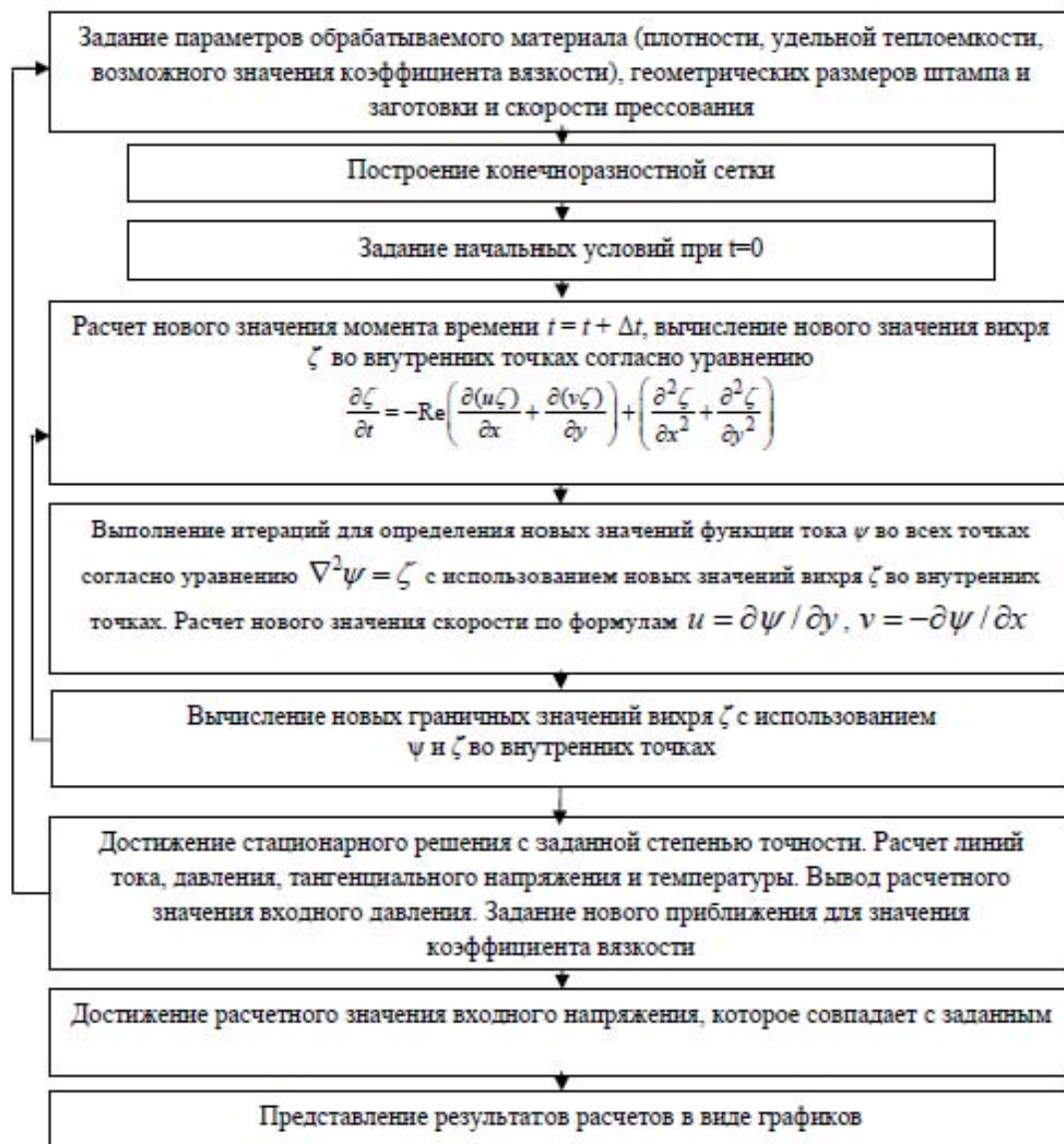


Рис. 6. Блок-схема алгоритма компьютерной программы вихревого решения задачи РКУП вязкого материала (уравнения Навье-Стокса), записанных для переменных функции тока  $\psi$  и вихря  $\zeta$

Будем рассматривать установившийся режим течения для которого начальные условия берутся в виде грубого приближения к стационарному решению:

$$\zeta_{i,j} = 1. \quad (9)$$

Граничные условия для рассматриваемой задачи сформулируем из следующих соображений. Семейство линий функции тока  $\psi(x,y) = \text{const}$  представляет собой совокупность линий тока. Т.е. на внешней стенке штампа  $ABC$  (рис. 4), которая также является линией тока, аналогично имеем  $\psi(x,y) = \text{const}$ . Поэтому на внешней стенке штампа  $ABC$  произвольно принимаем  $\zeta = 0$ ,  $\psi = 0$ , а в т.  $O$ , вокруг которой закручиваются линии тока, полагаем  $\zeta = 1$ ,  $\psi = 1$ , причем единица принимается потому, что все величины являются безразмерными. Т.о. получаем граничное условие для стенки:



$$\begin{cases} \zeta(x, y) = 0, \psi(x, y) = 0 (\text{внешний угол В штампа}) \\ \zeta(x, y) = 1, \psi(x, y) = 1 (\text{внутренний угол О штампа}) \end{cases} \quad (10)$$

Или, иначе говоря,

$$\begin{cases} \text{при } j \geq |i| & \text{имеем } \psi_{i,j} = 1, \zeta_{i,j} = 1 \\ \text{при } j \leq |i| - n & \text{имеем } \psi_{i,j} = 0, \zeta_{i,j} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Граничные условия на входе в очаг пластической деформации задаем на основании формулы Пуазейля, а вязкость материала находим методом последовательных приближений по экспериментально измеренным значениям давления прессования. Численно решим систему уравнений (7)-(8) с начальными (9) и граничными условиями (10)-(11) методом конечных разностей по схеме Ричардсона (рис. 6) для следующих значений входящих величин: угол между каналами штампа  $2\theta = 105^\circ$ , ширина каждого канала  $a = 28$  мм, угол внешнего

закругления  $\varphi = 0^\circ$ , плотность пластилина  $\rho = 1850$  кг/м<sup>3</sup>, предел текучести  $\sigma_S = 217$  кПа [9], удельная теплоемкость пластилина  $c = 1,004$  кДж/(кг·К), удельная теплопроводность  $0,7$  Дж/(м·с·К), скорость прессования  $U_0 = 0,2$  мм/с (рис. 3б), вязкость текущего материала  $\eta = 100$  Па·с, число Рейнольдса  $Re = 9,99 \cdot 10^{-5}$ , число шагов координаты  $n = 40$ , момент времени для построения первой изохроны  $t_1 = 100$  с, входное давление прессования  $P = 495$  кПа (рис. 3а) и относительная погрешность итераций составляет  $\varepsilon = 10^{-2}$ . Результаты численного интегрирования представлены на соответствующих эпюрах на рис. 4б, рис. 5, рис. 7. Сопоставление экспериментальных данных (рис. 3) и теоретических результатов (рис. 7) показывает хорошую согласованность между ними.

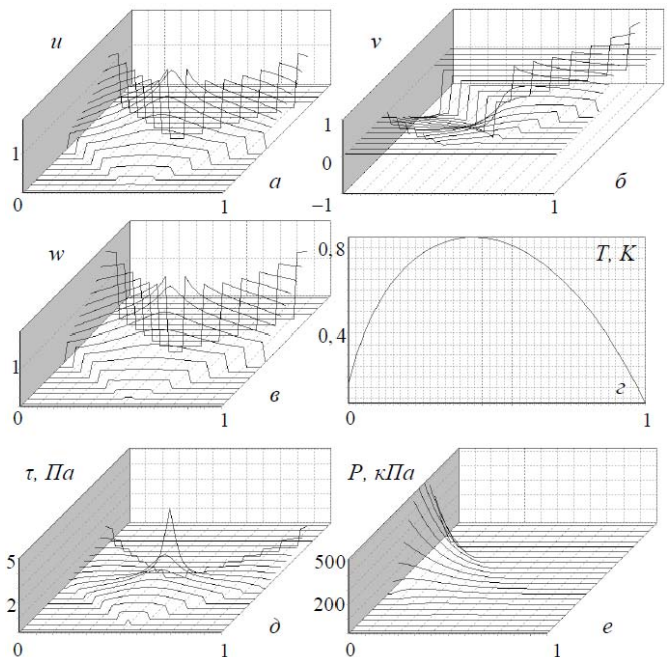


Рис. 7. Расчетные поля горизонтальной (а), вертикальной (б) и полной (в) скоростей потока, разогрева заготовки (г), касательных напряжений (д) и давления (е), причем вход в очаг деформации – слева, а выход – вправо, штамп для РКУП с  $2\theta = 105^\circ$  и  $\varphi = 0^\circ$

#### 4. Выводы

I. Существование больших градиентов скоростей и касательных напряжений обуславливает относительное вращательное движение для зерен обрабатываемого поликристаллического материала и тем самым формирует очаги турбулентности в очаге пластического деформирования материала при РКУП (рис. 1б) что, возможно, коррелирует с гипотезой Я. Е. Бейгельзимера [4].

II. На экспериментальных фото (рис. 1б-г) четко прослеживается формирование застойной зоны во внешнем углу штампа. Расчетная эпюра полной скорости потока (рис. 7в) также показывает, что незначительная часть входящего потока, которая наиболее удалена от точки О (рис. 4а), «захватывает» значительную часть объема штампа, называемую «застойной зоной», которая характеризуется существенным уменьшением скорости течения материала в окрестности т. В штампа (рис. 4а).

III. Предложенный гидродинамический подход позволяет больше узнать о механике процесса РКУП. Фактически аморфные и поликристаллические материалы в условиях пластического деформирования можно рассматривать как квазиньютоновские жидкости с эффективной вязкостью, которая учитывает не только вязкое трение, но и фрагментацию структуры обрабатываемого материала. Кроме того, на рис. 7д в зоне очага пластического деформирования (точка О, рис. 4а) можно видеть пик касательных напряжений, который характеризует значительную неоднородность деформаций в объеме обрабатываемого материала, что может вызвать растрескивание заготовки.

IV. Все разнообразие вязких течений обрабатываемых материалов при угловом прессовании описывается решениями одних и тех же дифференциальных уравнений в частных производных, уравнений Навье-Стокса, причем разные течения (т.е. решения) отличаются только граничными и начальными условиями, а также такими параметрами решения как число Рейнольдса  $Re$ . Подобие результатов компьютерного (рис. 7) и физического моделирования с использованием пластилина (рис. 1б-г), позволяет полагать, что разработанная методика найдет дальнейшее применение для анализа течения полимеров при РКУП в штампах со сложной геометрией.

**Список литературы:** 1. Валиев Р. З. Создание объемных наноструктурных материалов методами интенсивной пластической деформации для инновационных применений в технике и медицине / Р. З. Валиев // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – т. 18. – № 4. – С. 12–20. 2. Белошенко В. А. Твердофазная экструзия полимеров / В. А. Белошенко, Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин; НАН Украины, ДонФТИ им А. А. Галкина. – К: Наукова думка, 2008. – 207 с. 3. Segal V. M. Materials processing by simple shear/ V. M. Segal // Materials Science and Engineering A. – 1995. – Vol. 197. – P. 157–164. 4. Бейгельзимер Я. Е. Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью / Я. Е. Бейгельзимер // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – том 18. – № 4. – С. 77–86. 5. Manna R. Physical modeling of equal channel angular pressing using plasticine / R. Manna, P. Agrawal, J. Sushant, B. K. Mudda, N. Mukhopadhyay, G. V. Sastry // Scripta Materialia. – 2005. – Vol. 53, № 12. – P. 1357–1361. 6. Спосіб фізичного моделювання течії пластичних матеріалів: патент № UA 41132 U: МПК (2009) B21J 5/00, G01N 3/28 / Лаптев О. М., Періг О. В., Литвинов М. Г., Подлесний С. В.; власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. — № u200812900; заявл. 05.11.08; опубл. 12.05.09, Бюл. № 9, 09 р. — 2 с. : 2 іл. 7. Періг А. В. Компьютерное моделирование течения материалов при равноканальном угловом прессовании: анализ движения вязкой среды и экспериментальная верификация методом маркеров / А. В. Періг, А. М. Лаптев, Н. Н. Голоденко, А. Ю. Лошманов, М. Г. Литвинов // Обработка материалов давлением: сб. науч. пр. – Краматорськ: ДДМА. – 2009. – № 1 (20). – С. 57–62. – Бібліогр.: с. 62. – ISBN 978-966-379-325-2. 8. Роуч П. Дж. Вычислительная гидродинамика / П. Дж. Роуч; пер. с англ. В. А. Гущина, В. Я. Митниченко; под ред. П. И. Чушкина. – М.: Мир, 1980. – 616 с. 9. Sofuoglu H. Flow

#### УДК 621.777.4

**АЛИЕВ И.С.**, докт. техн. наук, проф., ДГМА, г. Краматорск  
**ГРУДКИНА Н.С.**, аспирант, ДГМА, г. Краматорск  
**МАРТЫНОВ С.В.**, ассистент, ДГМА, г. Краматорск

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНО - ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Проведен теоретический анализ процесса радиально - обратного выдавливания полых деталей с фланцем энергетическим методом верхней оценки. Получены зависимости кинематических характеристик от геометрических параметров детали. Проведен сравнительный анализ поэтапного формоизменения, полученный на основе предложенной расчётной схемы и программного продукта *Qform 2D*.

Ключевые слова : выдавливание, фланец, метод верхней оценки, *Qform 2D*

Проведено теоретичний аналіз процесу радіально - зворотного видавлювання порожніх деталей із фланцем енергетичним методом верхньої оцінки. Отримано залежності кінематичних характеристик від геометричних параметрів деталі. Проведено порівняльний аналіз поетапної формозміни, отриманий на основі запропонованої розрахункової схеми й програмного продукту *Qform 2D*.

Ключові слова: видавлювання, фланець, метод верхньої оцінки, *Qform 2D*

The theoretical analysis of the radial - reverse extrusion of hollow parts with a flange by energy method of upper bound is made. The dependences of the kinematic characteristics of the geometric parameters of the details is obtained. A comparative analysis of the phase-forming, obtained on the proposed design scheme and software *Qform 2D*.

Key words: extrusion, flange, method of upper bound, *Qform 2D*

Обеспечение конкурентоспособности продукции машиностроения в современных условиях связано прежде всего с разработкой и освоением новых технологий, позволяющих получить изделия высокого качества при минимальных материальных, трудовых и энергетических затратах на их производство. В связи с этим возрастает роль эффективных ресурсосберегающих методов обработки металлов давлением, среди которых видное место занимает холодная объёмная штамповка. Комбинирование схем обратного и радиального выдавливания при изготовлении деталей с фланцем повышает технологические возможности процессов штамповки, однако сопряжено с недостаточным освещением в литературе исследований как силового режима, так и конечного формоизменения детали. Одним из эффективных методов исследования процессов комбинированного выдавливания является энергетический метод, в котором ключевое значение имеет подбор подходящих функций, описывающих кинематически возможное поле скоростей (КВПС), удовлетворяющее граничным условиям, условию несжимаемости материала и условию неразрывности нормальных компонент скорости [1,2]. Следует отметить, что применение метода кинематических элементов позволяет описать сложные схемы течения при помощи эле-